Weber の法則によるベアリング外輪の表面欠陥検出†

西 松 豊 典*・林 一 哉**・鳥 羽 栄 治*

Detection of Defects on Outer-Ring Surface of Bearing Using Weber's Law

Toyonori NISHIMATSU*, Kazuya HAYASHI** and Eiji TOBA*

It is investigated and discussed how the defects on the outer-ring surface of bearing should be imaged and detected by the computer image processing technique with CCD camera and the Weber's law. After the analogue image of bearing's defect photographed by CCD camera changed the digital image at A/D converter and the binarization was done about the digital image using the Weber's law, the defects on bearing's surface were detected clearly. From the result of single regression analysis between the sensory value about the defect's grade by inspector and the measured defect's area was examined, there was a good agreement between the values calculated by this regression equation and the sensory value by inspectors.

Key Words: Weber's law, bearing's defect, computer image processing, sensory value, single regression analysis

1. はじめに

製品名, ロット番号, 社名を刻印する必要があるベアリング外輪の表面には主な欠陥として打痕欠陥がある。この打痕欠陥の検出・判定は, 高度に訓練された専門検査員の視覚判定基準に基づいて行われているので, 検査員間の判定のばらつきや曖昧さなどが生じている。

そこで, 本研究ではベアリングの外輪表面の打痕欠陥を CCD カメラを用いて鮮明に画像入力する方法を検討し, 入力したベアリング外輪表面画像上の欠陥を Weber の法則を用いて検出する試みを行った。さらに, 検出した打痕欠陥の状態を判定する手法についても考察した。

2. 試料および実験方法

試料は外輪表面に円形状の打痕欠陥が存在するベアリング外輪 12 種類である。なお, 打痕欠陥の直径は 4 種類 (0.3, 0.5, 1, 2 mm) で, 欠陥の深さは 3 種類 (0.1, 0.5, 1 mm) である。また, ベアリング外輪の外径は 90.0 mm, 内径 66.0 mm, 高さ 21.0 mm である。

Fig. 1 は, ベアリングの外輪表面の打痕欠陥を検出する試作システムの概要を示し, CCD モノクロ・カメラ

(1), 試料像拡大装置(2), 照明装置(3), 画像処理装置(4, ひまわり 50, (株) ライブラリー製), 処理画像表示モニター(9), コンピュータ(8), プリンター(10, 11) および試料台(13)から構成されている。

Fig. 1 に示すように, 試料台上に置かれたベアリング外輪の表面に対して照明光を均一に照射したのち, 接写レンズを通して拡大されたベアリングの表面画像は CCD カメラを用いて撮像される。ここで, 試料台の表面

Fig. 1 Schematic arrangement of experimental defect detection system

(1) CCD camera, (2) magnifying glass unit, (3) ring lighting unit, (4) image analyzer, (5) video input unit, (6) digital image memory, (7) video output unit, (8) personal computer, (9) RGB monitor for image indication, (10), (11) printer, (12) sample, (13) stage.

† 第 32 回計測自動制御学会学術講演会で発表(1993・8)

* 信州大学繊維学部 上田市常田 3-15-1

** 三重県工業技術センター 津市高茶屋小森町 3485

* Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, Ueda

** Mie Prefectural Industrial Research Institute, Tsu
(Received December 19, 1994)

(Revised February 24, 1995)

はベアリング表面と区別するため黒色(明度 N 2.8~3.0)に塗装した。また、CCD カメラの撮像素子はインターライン転送方式、画素数は 510×492 画素である。

CCD カメラで撮像されたベアリングの表面アナログ画像は、画像処理装置内の A/D 変換ボード上でデジタル画像に変換されたのち、各画素位置 (x, y) ごとに、その輝度値(輝度レベルは 256 階調に分割)が計測される。そして、このデジタル画像について画像情報解析が行われ、ベアリング表面の打痕欠陥が検出される。

3. 実験結果および考察

CCD カメラを用いてベアリング外輪表面上の打痕欠陥を鮮明に撮像する方法について検討を行った。検討項目は、照明形状、照明の種類、照度、カメラ絞りである。なお、蛍光体は高周波(24 kHz)の蛍光灯を用いた。

照明形状については、棒状蛍光灯より、ベアリング外輪全体について均一な照明が可能なリング形状の蛍光灯(リング外径: 80 mm)を採用した。

そして、リング形状である 3 種類の R, G, B 単波長域および 3 波長域昼白色蛍光体、3 種類の照度(200, 300, 400 lx)、および 3 種類のカメラ絞り(4.0, 5.6, 8.0)を種々組み合わせて、入力した各ベアリング外輪の表面画像を比較した。その結果、リング形状の 3 波長域昼白色蛍光体を 400 lx の照度で照明し、カメラ絞り 4.0 を用いた場合に、ベアリング表面を鮮明に CCD カメラへ入力できることがわかった。

Fig. 2 は、上記の条件下でベアリング外輪の表面(打痕欠陥の位置: ベアリングの上部中央に円形状欠陥、欠陥の大きさ: 直径 1.0 mm×深さ 0.1 mm)を撮像したデジタル画像、およびその輝度ヒストグラムである。

Fig. 2(b)に示すように、ベアリング表面の入力画像は輝度レベルが低い試料台の表面部分と輝度レベルが高いベアリング表面部分に双峰性のあるヒストグラムをもつ画像となることがわかる。しかし、この入力画像にはベアリング正常部(ベアリング表面において欠陥以外の部分をこのように呼ぶことにする)、欠陥および試料台が混在しているので、正常部および試料台を除去し欠陥だけを検出するために画像の 2 値化が必要となる。

一般に、人間は物体表面からの光の強さ I が ΔI だけ変化したとき、初めて物体表面の照度の変化を弁別できる。Weber¹⁾は与えられた刺激を感覚として認識する場合、標準刺激(I)の比は一定であると提唱した。

$$\frac{\Delta I}{I} = \text{const} \quad (1)$$

しかし、CCD カメラより入力した画像を画像処理する場合、各画素位置における照度ではなく輝度について処

(a) The surface image of bearing photographed by CCD camera

(b) Gray level histogram of bearing image. X axis shows the gray level and Y axis shows the pixel number

Fig. 2 Measurement of outer-ring surface of bearing by CCD camera

理がなされるので、(1)式はつぎのようになる。

$$\frac{\Delta S}{S} = \text{const} \quad (2)$$

ただし、 S : ベアリング表面の平均輝度、 ΔS : 輝度の標準偏差

いま、試料台およびベアリング表面について、画像計測した輝度値(S)と照度計を用いて測定した照度値(E)間の関係は次式で表わされた。

$$S = a \cdot E \quad (a = \text{const}) \quad (3)$$

よって、(2)式は(3)式の関係より

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta S}{E} = \text{const} \quad (4)$$

となる。また、(4)式より、試料台表面の照度(E_1)とベアリング表面の照度(E_2)との関係はつぎのようになる。なお、 ΔS_1 , ΔS_2 はおのおの試料台表面、ベアリング表面の輝度の標準偏差である。

$$\frac{\Delta S_1}{E_1} = \frac{\Delta S_2}{E_2} \quad (5)$$

$$\therefore \Delta S_2 = \Delta S_1 \cdot (E_2/E_1) \quad (6)$$

各ベアリングについて $\Delta S_1/E_1$ と $\Delta S_2/E_2$ とを測定した結果、(6)式はつぎのような実験式で表わせた。

$$\Delta S_2 = C \cdot \Delta S_1 \cdot (E_2/E_1) \quad (C = 3.9) \quad (7)$$

(7)式より、ベアリング表面の正常部の輝度領域は

Fig. 3 Defects of bearings detected by the experimental system. Defect's shape is a circle (diameter=0.3 mm, depth=1.0 mm)

Fig. 4 Sensory values of bearings' defects evaluated by inspectors. Defects' shape is a circle and the size (Diameter×Depth, mm) is as follows;

(1) $\phi 2.0 \times 0.1$, (2) $\phi 0.3 \times 0.1$, (3) $\phi 0.5 \times 0.5$, (4) $\phi 2.0 \times 0.5$, (5) $\phi 1.0 \times 1.0$, (6) no defect, (7) $\phi 0.3 \times 1.0$, (8) $\phi 0.3 \times 0.5$, (9) $\phi 1.0 \times 0.5$, (10) $\phi 0.5 \times 1.0$, (11) $\phi 2.0 \times 1.0$, (12) $\phi 0.5 \times 0.1$, (13) $\phi 1.0 \times 0.1$, (14) no defect.

($S_2 \pm \Delta S_2$) となり、正常部と欠陥とを識別するための2値化のしきい値 (TH) は、次式で表わされる。

$$TH = S_2 - \Delta S_2 \quad (8)$$

ただし、 S_2 : 正常ベアリング表面の平均輝度

そこで、(8)式より求めたしきい値で2値化を行ったのち反転処理した結果の一部を Fig. 3 に示す。

この手法を用いることによって、ベアリング外輪の表面に存在する打痕欠陥を直径 0.3 mm まで検出可能であることがわかった。また、欠陥の直径が同じでも欠陥深さが深いと、欠陥面積が大きくなる傾向がみられた。

しかし、このようにして検出した各欠陥の面積値より、専門検査員が行っているような欠陥の状態を判定することはできない。そこで、布や食品の官能評価予測²⁾に利用されている手法を用いて、欠陥面積測定値より打痕欠陥の状態を評価する回帰式を提案する。

14種類(打痕欠陥品 12種類, 正常品 2種類)の試料について、5名の専門検査員が打痕欠陥が(なし、かすかにある、少しある、やや大きい、大きい)の5段階で欠陥状態の評価を行った。

全検査員が判定した結果について、欠陥がなし→0点、かすかにある→1点、少しある→2点、やや大きい→3

Fig. 5 Relation between sensory values evaluated by inspectors and values calculated by eq.(9) on bearings' defects

点、大きい→4点を与え、各ベアリングについて判定者が評価した結果を平均化し、その結果を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 より、欠陥の直径が同じでも欠陥深さが深いと、欠陥が大きいと評価する傾向がみられる。この傾向は、各欠陥について画像計測した面積値の結果と一致する。

Fig. 4 より得た判定値 (y) と(8)式より求めたしきい値で検出した欠陥の面積値 (x) との関係について回帰分析を行った結果、両者の関係は次式で表わされた。

$$y = 3.22 \cdot x^{1/4} - 0.14 \quad (9)$$

つぎに、新たに作製した 14 種類のベアリング外輪(打痕欠陥品 12 種類, 正常品 2 種類)について画像計測した面積値を(9)式に代入し判定値を予測した。Fig. 5 は予測判定値と専門検査員が実際に評価した判定値との関係を示す。Fig. 5 より、予測判定値と専門検査員による判定値間にはよい一致(相関係数 $R=0.97$)がみられ、(9)式の妥当性が確認された。

4. おわりに

(1) リング状の 3 波長域昼白色蛍光体(照度 400 lx)でベアリング外輪の表面を均一に照明すると、CCD カメラを通して鮮明なベアリング表面画像が得られる。

(2) ベアリング表面上の打痕欠陥を検出する 2 値化のしきい値決定に、Weber の法則を用いた結果、最小直径 0.3 mm の打痕欠陥が鮮明に検出可能であった。

(3) ベアリング外輪表面の打痕欠陥の大きさについて、官能検査で得た判定値と検出した欠陥面積との関係について回帰分析を行い、その欠陥の状態を評価する回帰式を提案し、その妥当性について確認した。

参考文献

- 1) 和田, ほか: 感覚+知覚ハンドブック, 誠信書房 (1989)
- 2) たとえば, 西松, 酒井: パイル織物の風合い評価への情報理論の適用と視・触覚官能量に関する設計方程式の提案, 織学誌, 44-2, 88/95 (1988)